

KINETIKA REAKSI HIDROLISIS RANTING KERING DENGAN ASAM ENCER PADA KONDISI NON-ISOTERMIS

Megawati^{1*)}, Wahyudi Budi Sediawan²⁾, Hary Sulisty²⁾, dan Muslikhin Hidayat²⁾

¹⁾D3 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang
Gedung E1, Kampus Sekaran, Gunung Pati, Semarang 50229

²⁾Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281

^{*)}Penulis korespondensi: megawatie@yahoo.com

Abstrak

Bio-etanol merupakan salah satu bahan bakar organik yang dapat diproduksi dari pati dan selulosa. Bahan berbasis selulosa dapat ditemukan dalam limbah organik, diantaranya: grajen kayu, ranting kering, daun kering, tongkol jagung, sekam padi dan lain-lain. Langkah-langkah penting pada produksi etanol dari lignoselulosa ialah hidrolisis untuk mengkonversi hemiselulosa dan selulosa menjadi gula, fermentasi gula untuk memproduksi etanol, dan pemurnian etanol. Penelitian ini mempelajari reaksi hidrolisis ranting kering dengan asam encer pada kondisi non-isotermis. Dua ratus gram ranting kering dicampur dengan 1200 cm³ larutan asam sulfat 0,18 N dan dipanaskan di dalam autoklaf. Selama proses hidrolisis ini, suhu akan terus naik (non-isotermis), kemudian setelah mencapai suhu tertentu dijaga tetap (suhu akhir). Hasil hidrolisis pertama diambil pada suhu 413 K dan seterusnya diambil setiap interval 5 menit. Suhu akhir divariasi pada 433 K, 453 K, 473 K dan 493 K. Metode Fehling dipilih untuk menganalisis kandungan gula di dalam sampel. Persamaan kinetika reaksi diperoleh dengan mengolah data dengan pendekatan model shrinking-core dengan ukuran partikel tetap. Nilai tetapan kecepatan reaksi meningkat sedangkan nilai tetapan transfer massa relatif tidak berubah pada berbagai suhu. Tetapan kecepatan reaksi dapat didekati dengan persamaan Arrhenius, dengan frekuensi tumbukan $A_r = 0,083 \text{ l/(mol.menit)}$ dan energi aktivasi $E_r = 20.000 \text{ J/mol}$. Untuk menyelidiki langkah mana yang mengontrol laju proses, dibandingkan tetapan kecepatan reaksi dan tetapan transfer massa pada 493 K, diperoleh nilai tetapan transfer massa berkisar $0,06 \text{ l/(mol.menit)}$, dan nilai tetapan kecepatan reaksi berkisar $0,00051 \text{ l/(mol.menit)}$, sehingga diperoleh bilangan Hatta $0,00933$. Karena bilangan Hatta $< 0,02$ maka dapat disimpulkan bahwa reaksi kimia lebih mengontrol daripada transfer massa.

Kata kunci: hidrolisis, kinetika reaksi, non-isotermis, shrinking-core

Abstract

Bio-ethanol is one of bio-fuels, which can be produced from starch and lignocelluloses. The lignocellulosic substance is found in organic waste e.g. sawdust, dry-twigs, dry-leaves, corncob, rice husk, etc. Major steps in producing ethanol from lignocelluloses substance consist of hydrolysis to convert hemi-cellulose and cellulose to sugars, fermentation of sugars to produce ethanol, and ethanol purification. This paper presents the study on the reaction kinetics of dilute acid hydrolysis of dry-twigs under non-isotherm condition. Two hundreds grams of dry-twigs was mixed with 1200 cm³ of 0.18 N sulfuric acid solutions. The mixture was then heated in an autoclave. During the reaction, the temperature was increasing and after reaching a certain value, then it was kept constant as the final temperature. The first liquid sample was taken at temperature of 413 K and repeated every 5 minutes interval. The final temperatures were varied as follows: 433 K, 453 K, 473 K, and 493 K. The sugar contents in the sample were analyzed using Fehling method. The data obtained were then applied to verify the unchanging size shrinking-core models. The reaction rate constants increased but the mass transfer coefficient was comparatively constant at various temperatures. The reaction rate constant can be described with Arrhenius equation with frequency factor $A_r = 0.083 \text{ l/(mol.minute)}$ and activation energy $E_r = 20.000 \text{ J/mol}$. To study the controlling process, the reaction rate constant was compared with the mass transfer coefficient at the temperature of 493 K, the mass transfer coefficient

was about 0.06 l/(mol.min) and the reaction rate constant was about 0.00051 l/(mol. in), so the Hatta number was 0.009333. The Hatta number < 0.02 suggests that chemical reaction is indefinitely slow and rate controlling.

Keywords: hydrolysis, reaction kinetic, non-isotherm, shrinking-core

PENDAHULUAN

Dalam dua dekade terakhir, salah satu problem besar yang dihadapi oleh banyak negara ataupun dunia secara keseluruhan adalah berkurangnya ketersediaan minyak bumi. Problem ini sangat serius di negara-negara yang sedang berkembang, karena pertumbuhan ekonominya sangat tergantung pada minyak sebagai sumber energi. Di lain pihak, pemanasan global yang diakibatkan oleh pemakaian bahan bakar berbasis minyak bumi (lebih umum bahan baku fosil) makin terasa. Kedua hal tersebut mendorong dikembangkannya bahan bakar alternatif yang bersifat terbarukan dan yang tidak berakibat pada pemanasan global. Dalam hal ini bioetanol adalah salah satu alternatif yang menjanjikan. Bioetanol dibuat dari biomassa yang berasal dari CO₂ dari udara, sehingga jika dibakar, meskipun menghasilkan CO₂, namun secara netto tidak terjadi penambahan CO₂ di atmosfer.

Bioetanol dapat dibuat dari biomassa berbasis pati atau berbasis lignoselulosa. Namun biomassa berbasis pati umumnya dimanfaatkan sebagai makanan atau pakan, sehingga pemanfaatannya sebagai bahan baku bioetanol bisa mengganggu penyediaan makanan atau pakan. Oleh karena itu, pemanfaatan biomassa berbasis lignoselulosa perlu dikembangkan. Contoh biomassa berbasis lignoselulosa adalah kayu, ranting, daun, sekam, tongkol jagung, dll.

Indonesia sebagai negara tropis memiliki sumber-sumber lignoselulosa antara lain pada sampah organik perkotaan yang belum tertangani dengan baik. Komposisi bahan organik di dalam sampah kota berkisar 65% (Suyitno, 2007). Penelitian tentang potensi sampah perkotaan (studi kasus di Daerah Istimewa Yogyakarta) sebagai bahan baku etanol pernah dilakukan dengan mengadakan klarifikasi sampah kota berdasar kandungan holoselulosa (selulosa dan hemiselulosa). Sampah kota mengandung kurang lebih 17% ranting kering dan kayu (Kambu, 2008).

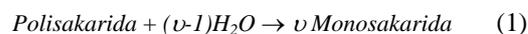
Terdapat tiga tahapan utama proses pengolahan lignoselulosa menjadi etanol, yaitu hidrolisis hemiselulosa dan selulosa menjadi gula terlarut, fermentasi gula menjadi etanol, dan pemurnian etanol sampai kadar absolut (Hagerdal dkk., 2006). Menurut Badger (2002) terdapat dua jenis proses hidrolisis yang dapat dijalankan, yaitu hidrolisis enzim dan hidrolisis kimiawi. Dipilih hidrolisis kimiawi karena membutuhkan biaya relatif murah dan memerlukan waktu tidak terlalu lama (Tahezadeh dkk, 1997; Palmqvist dan Hahn-Hagerdal, 2000). Penelitian ini mempelajari hidrolisis ranting kering menjadi gula dengan asam encer. Proses hidrolisis lignoselulosa dengan asam encer pernah dicoba dengan kondisi operasi: asam sulfat 0,5%, tekanan 11-12 bar selama 45 menit. Hemiselulosa sebanyak 80% w/w dapat

terhidrolisis di bawah suhu 200⁰C, tetapi konversi maksimal dicapai pada suhu di atas 220⁰C (Tahezadeh, 2003). Maloney dkk, (1985) pernah meneliti kinetika reaksi hidrolisis kayu keras dengan asam encer. Kinetika reaksi ini diturunkan dari peruraian gugus xilan.

Menurut Karimi dkk., (2006) bentuk dan ukuran partikel relatif tidak memberi pengaruh pada reaksi hidrolisis batang padi dengan asam encer. Di dalam melakukan penelitiannya, Karimi memakai batang padi dengan variasi ukuran partikel. Batang padi tersebut dihidrolisis dengan asam encer sampai tekanan 20 bar selama 10 menit. Nilai *yield* glukosa yang didapatkan untuk ukuran partikel 2-50 mm sebesar 43,7% dan untuk ukuran partikel 20-48 mesh sebesar 44,6%.

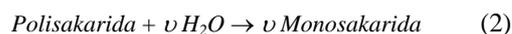
Fundamental

Reaksi kimia yang terjadi pada proses hidrolisis lignoselulosa dapat dituliskan sebagai reaksi antara polimer dengan air, yang dituliskan pada persamaan (1).



dengan ν adalah koefisien stoikiometri.

Nilai ν sangat besar maka nilai $(\nu-1) \sim \nu$, sehingga persamaan (1) dapat disederhanakan menjadi persamaan (2).



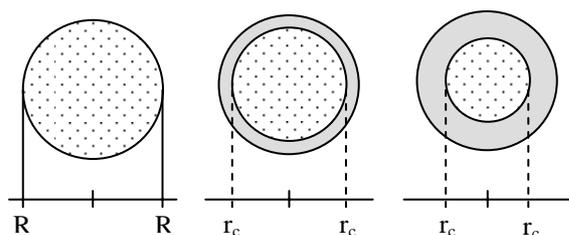
Reaksi dapat dinyatakan dengan simbol (A adalah H₂O, B adalah polimer, dan D adalah gula).



Jumlah polimer B diukur sebagai ekivalen gula (melalui hidrolisis total). Dengan cara itu persamaan (3) dapat ditulis sebagai persamaan (4).



Lignoselulosa tidak larut dalam air dan asam encer, kemungkinan besar reaksi yang terjadi merupakan reaksi heterogen pada permukaan padatan. Produk adalah hasil cair yaitu gula. Jumlah gula yang didapatkan cukup sedikit dibanding jumlah hemiselulosa dan selulosa yang mestinya dapat terkonversi menjadi gula, sehingga masih terdapat sisa reaktan yang cukup banyak. Beberapa hal di atas menjadi alasan dipilihnya pendekatan terhadap mekanisme reaksi dengan model *shrinking-core* dengan ukuran partikel tetap (Gambar 1).



Gambar 1. Profil perubahan partikel berdasarkan model *shrinking-core* dengan ukuran partikel tetap

Asumsi yang dipakai dalam menyusun persamaan kinetika adalah:

1. Reaksi heterogen padat – cair.
2. Reaksi yang terjadi: $A(l) + B(s) \rightarrow D(l)$
3. Padatan berbentuk silinder.
4. Mekanisme reaksi mengikuti model *Shrinking-Core* dengan ukuran partikel tetap.

Ada tiga langkah yang terjadi selama proses (Levenspiel, 1999; Smith, 1981) yaitu:

Langkah 1. Perpindahan massa zat pereaksi dari badan cairan melalui lapisan film cairan ke permukaan butir padatan.

$$-\frac{dN_A}{dt} = k_m' \cdot 2\pi R \cdot L (C_{AL} - C_{AC}) \quad (5)$$

Langkah 2. Reaksi kimia di permukaan butir padatan.

$$-\frac{dN_A}{dt} = k' \cdot 2\pi r_c \cdot L C_{AC} \quad (6)$$

Langkah 3. Perpindahan massa hasil reaksi dari permukaan butir padatan melalui lapisan film ke badan cairan. Pada reaksi *irreversible*, langkah ini dianggap tidak mempengaruhi laju langkah 1 dan 2, sehingga diabaikan.

Penentuan nilai C_{AC} tidaklah mudah dilakukan maka besaran itu sebaiknya dihilangkan. Pembentukan persamaan C_{AC} dari persamaan (6) dapat dituliskan pada persamaan (7).

$$C_{AC} = \frac{-\frac{dN_A}{dt}}{k' \cdot 2\pi r_c \cdot L} \quad (7)$$

Substitusi persamaan (7) ke persamaan (5) menghasilkan persamaan (8).

$$-\frac{dN_A}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{k_m' \cdot 2\pi R \cdot L} + \frac{1}{k' \cdot 2\pi r_c \cdot L}} C_{AL} \quad (8)$$

Jika ρ_B adalah densitas molar B (partikel) dan V adalah volum partikel, maka untuk sebuah partikel berlaku persamaan (9) yang menyatakan jumlah mol (N_B).

$$N_B = \rho_B \cdot V = \left[\frac{\text{mol B}}{\text{m}^3 \text{butir}} \text{m}^3 \text{butir} \right] \quad (9)$$

Sesuai stoikiometri, persamaan (9) dapat diturunkan menjadi persamaan (10).

$$-dN_B = -dN_A = -\rho_B dV = -2\pi \rho_B \cdot r_c \cdot L dr_c \quad (10)$$

Substitusi persamaan (10) ke persamaan (8) menghasilkan persamaan (11).

$$\frac{dr_c}{dt} = -\frac{1}{\frac{\rho_B \cdot r_c}{k_m' \cdot R} + \frac{\rho_B}{k'}} C_{AL} \quad (11)$$

Hubungan jari-jari dengan konversi dinyatakan pada persamaan (12), dengan asumsi panjang dan jumlah ranting selama reaksi tetap.

$$x_B = \frac{\text{massa padat awal} - \text{massa padat saat } t}{\text{massa padat awal}} \quad (12)$$

$$x_B = \frac{\pi R^2 \cdot L \cdot \rho_B - \pi r_c^2 \cdot L \cdot \rho_B}{\pi R^2 \cdot L \cdot \rho_B} = 1 - \left(\frac{r_c}{R} \right)^2 \quad (13)$$

Jika x_B didiferensialkan terhadap t, akan didapatkan persamaan (14).

$$\frac{dx_B}{dt} = -\frac{2r_c}{R^2} \frac{dr_c}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{dr_c}{dt} = -\frac{R^2}{2r_c} \frac{dx_B}{dt} \quad (15)$$

Substitusi persamaan (15) ke persamaan (11) menghasilkan persamaan (16).

$$\frac{dx_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\rho_B \cdot R}{2k_m'} + \frac{\rho_B \cdot R^2}{2k' \cdot r_c}} C_{AL} \quad (16)$$

Hubungan jari-jari dengan konversi yang dinyatakan pada persamaan (13) dapat disubstitusi ke persamaan (16) menghasilkan menghasilkan persamaan (17).

$$\frac{dx_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\rho_B \cdot R}{2k_m'} + \frac{\rho_B \cdot R}{2k'(1-x_B)^{1/2}}} C_{AL} \quad (17)$$

$$C_{AL} = C_{AL0} - C_{B0} \cdot x_B \quad (18)$$

Hasil substitusi persamaan (18) ke persamaan (17) menghasilkan persamaan (19), sebagai persamaan hubungan konversi dan waktu.

$$\frac{dx_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\rho_B \cdot R}{2k_m'} + \frac{\rho_B \cdot R}{2k'(1-x_B)^{1/2}}} (C_{AL0} - C_{B0} \cdot x_B) \quad (19)$$

Masing-masing nilai ρ_B dan R adalah konstan, sehingga persamaan (19) dapat dinyatakan dengan persamaan (20).

$$\frac{dx_B}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{k_m} + \frac{1}{k(1-x_B)^{1/2}}} (C_{AL0} - C_{B0} \cdot x_B) \quad (20)$$

dengan $k_m = \frac{2k_m'}{\rho_B \cdot R_r}$ dan $k = \frac{2k'}{\rho_B \cdot R_r}$

METODE PENELITIAN

Ranting kering sebagai limbah lignoselulosa didapatkan dari pohon Nangka, Mangga dan Jambu Air (dari hasil hidrolisis total didapat kandungan gula total 0,15 mol/l). Ranting kering yang mempunyai diameter seragam 7 mm dipotong-potong. Oleh karena mengubah ranting kering menjadi butiran memerlukan peralatan tambahan, energi, dan biaya, maka ranting kering yang dipakai dicoba untuk tidak digiling terlebih dahulu, dengan konsistensi bahwa model heterogen akan sesuai. Percobaan diawali dengan menimbang 200 g ranting kering selanjutnya dicampur dengan 1200 cm³ larutan asam sulfat 0,18 N dan dipanaskan di dalam autoklaf. Autoklaf yang digunakan memiliki volum 2 L dan dilengkapi dengan jaket pemanas, motor penggerak autoklaf, indikator tekanan, pengatur suhu dan kran untuk mengambil sampel. Selama proses hidrolisis ini, suhu akan terus naik (non-isotermis), kemudian setelah mencapai suhu tertentu dijaga tetap (suhu akhir). Metode Fehling dipilih untuk menganalisis kandungan gula di dalam sampel. Metode ini dipilih karena metode Fehling merupakan metode analisis gula total secara gravimetri yang lebih lengkap untuk mendeteksi beberapa jenis gula daripada metode gravimetri yang lain dan cukup baik diterapkan untuk konsentrasi gula yang encer. Pengambilan sampel dimulai saat suhu mencapai 413 K dan dilakukan lagi setiap interval 5 menit sampai proses berlangsung 35 menit. Suhu akhir divariasi pada 433 K, 453 K, 473 K dan 493 K.

Pada proses hidrolisis ini, terjadi dua proses seri, yaitu transfer massa (fisis) dan reaksi kimia. Kecepatan reaksi keseluruhan dipengaruhi oleh dua buah tetapan sesuai persamaan (20), yaitu tetapan transfer massa, $(1/k_m)$, dan tetapan reaksi kimia, $1/k(1-x_B)^{1/2}$. Nilai tetapan transfer massa (k_m) dipengaruhi oleh difusivitas, dan salah satu persamaan yang menyatakan difusivitas sebagai fungsi suhu ditulis dalam Bird (2002) seperti persamaan (21).

$$D_{AB} = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{(\varphi_B M_B)^{1/2} T}{\mu \tilde{V}_A^{0,6}} \quad (21)$$

Secara tidak langsung persamaan di atas memperlihatkan bahwa suhu kurang memberi pengaruh pada tetapan transfer massa dibanding pada tetapan reaksi (22) (Fogler, 1999).

$$k = A_r \cdot \exp\left(\frac{-E_r}{RT}\right) \quad (22)$$

Hubungan suhu (T) dan waktu (t) pada kondisi non-isotermis dicari melalui persamaan empiris yang dicoba-coba berdasar data percobaan. Persamaan

empiris yang cocok ialah persamaan (23).

$$T = T_0 + at^b \quad (23)$$

Nilai T_0 diambil tetap, yaitu = 413 K, sedangkan nilai a dan b dicari berdasarkan data percobaan setiap melakukan proses hidrolisis. Hidrolisis terpaksa dijalankan secara non-isotermis karena proses hidrolisis perlu pemanasan sampai suhu relatif tinggi, dan proses pemanasan memerlukan waktu, sementara reaksi hidrolisis sudah berlangsung, sehingga perlu dikembangkan persamaan-persamaan untuk proses non-isotermis.

Percobaan menghasilkan data suhu (T) dan konsentrasi gula (C_D) pada berbagai waktu (t). Jika nilai k_m , A_r , dan E_r tersedia, persamaan (20), (22), dan (23) dapat diselesaikan dengan Runge Kutta. Nilai k_m , A_r , dan E_r dicoba-coba sampai diperoleh hasil hitungan yang mendekati data percobaan. Secara lebih sistematis, nilai k_m , A_r , dan E_r yang dipilih adalah yang memberikan nilai *Sum of Squares of Errors (SSE)* yang minimum, yang ditulis sebagai persamaan (24) (Sediawan dan Prasetya, 1997).

$$SSE = \sum (x_{Bhitung} - x_{Bdata})^2 \quad (24)$$

Untuk mengetahui proses mana yang mengontrol laju hidrolisis, dicari proses yang berlangsung relatif lambat, dipakai bilangan Hatta (M_H), yaitu salah satu parameter tak berdimensi yang didefinisikan sebagai perbandingan laju reaksi terhadap laju transfer massa, yang ditulis sebagai persamaan (24) (Bird, 2002).

$$M_H = \frac{N_{A(reaksi)}}{N_{A(transfer\ massa)}} \quad (24)$$

Levenspiel (1999) memberi batasan-batasan nilai bilangan Hatta untuk mengevaluasi tipe reaksi yang terjadi.

1. Jika $M_H > 2$, tipe reaksi sangat cepat, sehingga transfer massa yang mengontrol.
2. Jika $0,02 < M_H < 2$, transfer massa dan reaksi kimia yang mengontrol.
3. Jika $M_H < 0,02$, tipe reaksi sangat lambat, sehingga reaksi kimia yang mengontrol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis kandungan lignoselulosa dalam ranting kering yang dilakukan dalam penelitian pendahuluan ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi lignoselulosa dalam ranting kering

Senyawa	Komposisi (%)
Air	11,1320
Hemiselulosa	20,7978
Selulosa	33,3865
Lignin	26,5429

Data untuk konsentrasi gula dan pengukuran suhu dari hasil percobaan serta hasil perhitungan

dapat dilihat pada Tabel 2, 3, 4, dan 5 serta dinyatakan pada Gambar 2, 3, 4, dan 5. Nilai tetapan kecepatan reaksi (k_r) dan tetapan transfer massa (k_m) hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 2, 3, 4, dan 5. Profil berkurangnya reaktan juga dapat dilihat pada Gambar 2, 3, 4, dan 5. Pendekatan reaksi heterogen dengan model *shrinking-core* dengan ukuran partikel tetap dapat menggambarkan kinetika reaksi hidrolisis lignoselulosa dari ranting kering dengan asam encer pada kondisi non-isotermis (Gambar 2, 3, 4, dan 5). Hasil ini berbeda dengan yang ditemukan Karimi, yang memperlihatkan bahwa ukuran partikel tidak memberi pengaruh pada proses hidrolisis batang padi, yang berarti model homogen lebih cocok.

Tabel 2. Hasil percobaan dan perhitungan pada suhu akhir 433 K

t mnt	T, K		C _D , mol/l		k _r l/(mol.menit)	k _m
	data	hit.	data	hit.		
0	413	413	0,013	0,013	0,00025	0,05661
5	433	433	0,027	0,025	0,00032	0,05661
10	433	433	0,039	0,037	0,00032	0,05661
15	433	433	0,050	0,048	0,00032	0,05661
20	433	433	0,060	0,059	0,00032	0,05661
25	433	433	0,069	0,069	0,00032	0,05661
30	433	433	0,078	0,078	0,00032	0,05661
35	433	433	0,085	0,087	0,00032	0,05661

Tabel 3. Hasil percobaan dan perhitungan pada suhu akhir 453 K

t mnt	T, K		C _D , mol/l		k _r l/(mol.menit)	k _m
	data	hit.	data	hit.		
0	413	413	0,014	0,014	0,00022	0,05661
5	442	446	0,028	0,026	0,00034	0,05661
10	453	449	0,042	0,039	0,00036	0,06000
15	453	451	0,055	0,051	0,00037	0,06000
20	453	452	0,067	0,063	0,00037	0,06000
25	453	453	0,077	0,075	0,00038	0,06000
30	453	453	0,086	0,085	0,00038	0,06000
35	453	453	0,090	0,095	0,00038	0,06000

Persamaan Arrhenius untuk nilai tetapan kecepatan reaksi (k) ditulis sebagai persamaan (24).

$$k = 0,083 \cdot \exp\left(\frac{-20.000}{R_r T}\right) \quad (24)$$

Kinetika reaksi hidrolisis lignoselulosa dengan asam encer pernah didekati dengan reaksi pseudo homogen order satu, dengan sumber lignoselulosa dari grajen kayu dan diperoleh nilai E_r/R sebesar 1920 K (Sediawan dkk, 2007). Studi hidrolisis lignoselulosa dari sampah kota, menghasilkan nilai E_r/R sebesar 2258 K, 2220 K, dan 2247 K untuk masing-masing bahan baku; ranting kering, daun kering, dan sekam padi (Megawati, 2009). Studi hidrolisis limbah pemrosesan kapas oleh Beck dan Wang (1982) menghasilkan E_r sebesar 5600 cal/mol (E_r/R sebesar 2818,319 K). Pendekatan model *shinking-core* dengan ukuran partekel tetap pada penelitian ini menghasilkan $E_r/R = 2405$ K, berarti nilai E_r/R yang diperoleh dari

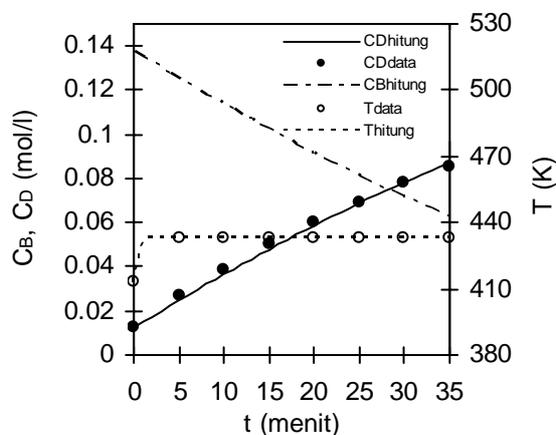
penelitian ini relatif konsisten dengan hasil penelitian-penelitian pendahulu.

Tabel 4. Hasil percobaan dan perhitungan pada suhu akhir 473 K

t mnt	T, K		C _D , mol/l		k _r l/(mol.menit)	k _m
	data	hit.	data	hit.		
0	413	413	0,014	0,014	0,00025	0,05661
5	442	447	0,029	0,027	0,00038	0,05661
10	459	457	0,044	0,041	0,00043	0,06000
15	476	464	0,058	0,056	0,00046	0,06000
20	473	469	0,071	0,071	0,00049	0,06000
25	473	473	0,083	0,086	0,00051	0,06400
30	473	473	0,092	0,099	0,00051	0,06400
35	473	473	0,111	0,110	0,00051	0,06400

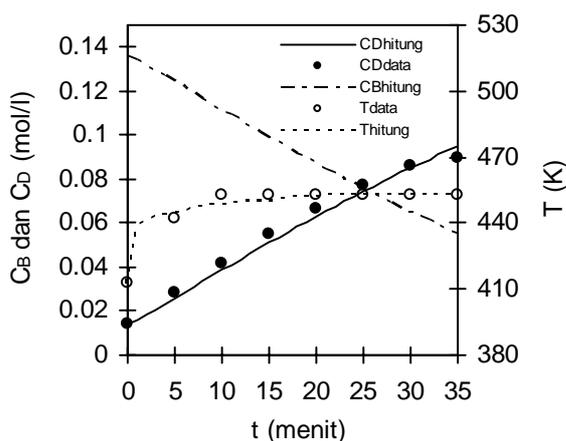
Tabel 5. Hasil percobaan dan perhitungan pada suhu akhir 493 K

t mnt	T, K		C _D , mol/l		k _r l/(mol.menit)	k _m
	data	hit.	data	hit.		
0	413	413	0,015	0,015	0,00025	0,05661
5	442	445	0,028	0,027	0,00038	0,05661
10	459	459	0,042	0,042	0,00045	0,06000
15	479	471	0,057	0,058	0,00051	0,06000
20	493	481	0,072	0,074	0,00056	0,06000
25	493	489	0,085	0,090	0,00062	0,06400
30	493	493	0,096	0,106	0,00064	0,07000
35	493	493	0,132	0,119	0,00064	0,07000

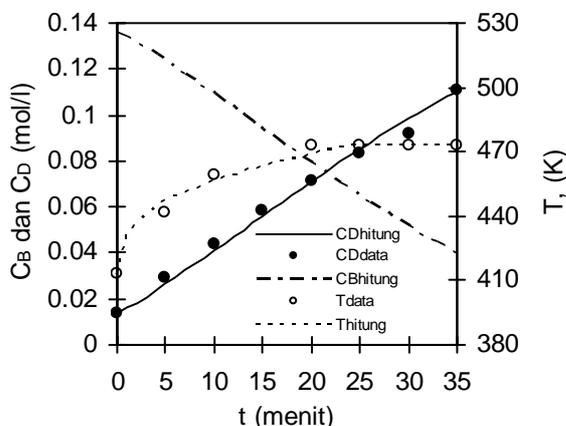


Gambar 2. Plot C_B, C_D dan T vs waktu pada suhu akhir 433 K

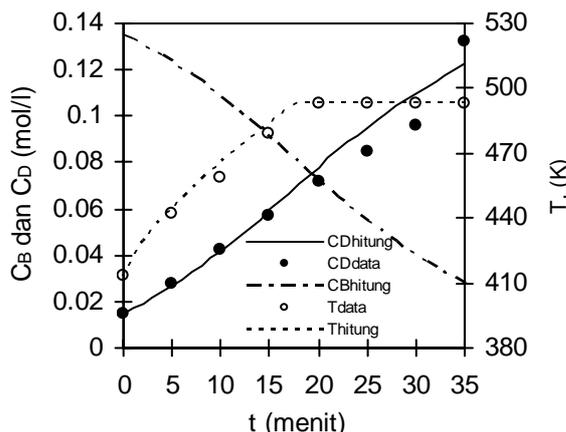
Untuk menyelidiki langkah mana yang mengontrol laju proses, nilai tetapan kecepatan reaksi dibandingkan dengan nilai tetapan transfer massa pada suhu akhir 493 K, didapatkan nilai tetapan kecepatan reaksi (k) berkisar 0,00051 l/(mol.menit), dan nilai tetapan transfer massa (k_m) berkisar 0,06 l/(mol.menit). Dari kedua nilai tersebut diperoleh bilangan Hatta (M_H) sebesar 0,00933. Levenspiel (1999) menyatakan bahwa untuk nilai $M_H < 0,02$ reaksi kimia yang terjadi sangat lambat, sehingga mengontrol.



Gambar 3. Plot C_B , C_D dan T vs waktu pada suhu akhir 453 K



Gambar 4. Plot C_B , C_D dan T vs waktu pada suhu akhir 473 K



Gambar 5. Plot C_B , C_D dan T vs waktu pada suhu akhir 493 K

Yield gula yang didapatkan dari penelitian ini sebesar 23,76 g/200 g bahan baku (11,88% bahan baku) pada suhu akhir 493 K. Hidrolisis lignoselulosa dari tandan kosong kelapa sawit dengan konsentrasi asam 2-6% menghasilkan gula dengan yield 31,74% (Rahman dkk., 2006). Miller dan Hester (2007) pernah mencoba melakukan hidrolisis lignoselulosa dari grajen

kayu pinus dengan asam pekat (30%) pada suhu 130°C, dan mendapatkan gula dengan yield 50%. Dari beberapa hasil penelitian tersebut dapat dilihat bahwa yield gula hasil hidrolisis masih dapat ditingkatkan dengan memperbesar konsentrasi katalis.

KESIMPULAN

Kinetika reaksi hidrolisis ranting kering dengan asam encer merupakan reaksi heterogen yang dapat didekati dengan model *shrinking-core* dengan ukuran partikel tetap. Tetapan kecepatan reaksi dapat didekati dengan persamaan Arrhenius dengan nilai faktor frekuensi $A_r = 0,083$ l/(mol.menit) dan energi aktivasi $E_r = 20.000$ J/(mol.K). Bilangan Hatta yang diperoleh dari hasil perhitungan sebesar 0,00933, maka dapat disimpulkan bahwa reaksi kimia lebih mengontrol dibanding transfer massa.

DAFTAR NOTASI

- a = tetapan
- A = H₂O
- A_r = faktor tumbukan, l/mol.menit
- b = tetapan
- B = polimer gula
- C = konsentrasi, mol/l
- C_{AC} = konsentrasi air pada permukaan butir padatan
- C_{AL} = konsentrasi air pada larutan
- D = monomer gula
- E_r = energi aktivasi, K
- k = k' = tetapan reaksi kimia, l/mol.menit
- k_m = k_m' = tetapan transfer massa, l/mol.menit
- l = cairan
- L = panjang ranting, m
- M_H = bilangan Hatta
- N = jumlah mol, mol
- r_c = jari-jari lignoselulosa yang belum bereaksi setiap waktu, m
- R = jari-jari awal ranting, m
- R_r = tetapan gas ideal, 8,314 J/mol.K
- s = padatan
- t = waktu, menit
- T = suhu, Kelvin
- T₀ = suhu awal, Kelvin
- V = volum
- x = konversi reaksi
- ρ_B = densitas ranting, mol/m³
- υ = koefisien stoikiometri

DAFTAR PUSTAKA

Badger, P. C., (2002), *Ethanol from Cellulose: A General Review*, Trends in New Crops and New Uses, pp. 17-21, ASHS Press., Alexandria, VA.

Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., (2002), *Transport Phenomena*, 2 ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 695-697.

Fogler, H. S., (1999), *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 3 ed., Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, pp. 6-9.

- Hahn-Hagerdal, B., Galbe, M. F. M., Gorwa-Grauslund, Liden, G., and Zacchi, G., (2006), *Bio-ethanol-the Fuel of Tomorrow from the Residues of Today*, Science Direct, Elsevier.
- Kambu, O. J., (2008), Studi Karakteristik Sampah Propinsi D.I. Yogyakarta Sebagai Alternatif Bahan Baku dalam Produksi Etanol, *Tesis*, Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah mada, Yogyakarta.
- Karimi, K., Kheradmandinia, S., and Taherzadeh, M. J., (2006), Conversion of Rice Straw to Sugars by Dilute-acid Hydrolysis, *Biomass & Bioenergy*, vol. 30, pp. 247-253, Elsevier.
- Levenspiel, O., (1999), *Chemical Reaction Engineering*, 2 ed., pp. 411-425, Wiley Eastern Ltd., New Delhi.
- Maloney, M. T., Chapman, T. W., and Baker, A. J., (1985), Dilute Acid Hydrolysis of Paper Birch: Kinetics Studies of Xylan and Acetyl-Group Hydrolysis, *Biotechnology and Bioengineering*, vol. XXVII, pp. 355-361, John Wiley & Sons, Inc.
- Megawati, Sediawan, W. B., Sulisty, H., dan Hidayat, M., (2009), Kinetika Reaksi Hidrolisis Lignoselulosa dari Sampah Organik Perkotaan dengan Asam Encer pada Kondisi Non-Isotermis, *Prosiding Seminar Soebardjo Brotohardjono VI*, A3-1-7, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Surabaya, 2009.
- Meller, S. and Hester, R., (2007), Concentrated Acid Conversion of Pine Sawdust to Sugars. Part II; High Temperature Batch Reactor Kinetics of Pretreated Pine Sawdust, *Chemical Engineering Communications*, Vol. 194, pp. 103-116.
- Palmqvist, E. and Hagerdal, B. H., (2000), Fermentation of Lignocellulosic Hydrolysates. II: Inhibition and Detoxification, *Bioresource Technology*, Elsevier, vol. 74, pp. 25-33.
- Sediawan, W.B. dan Prasetya, A., (1997), *Pemodelan Matematis Dan Penyelesaian Numeris Dalam Teknik Kimia*, Andi, Yogyakarta.
- Sediawan, W.B., Megawati, Millati, R., dan Syamsiah, S., (2007), Hydrolysis of Lignocellulosic Waste for Ethanol Production, *International Biofuel Conference*, Bali, Indonesia.
- Smith, J. M., (1981), *Chemical Engineering Kinetic*, McGraw-Hill Book Company Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- Suyitno, (2007), Waste to Energy, web: <http://msuyitno.blogspot.com/2007/07/energi-dari-sampah-1-pondahuluan.html> (diakses pada 8 Desember 2007).
- Taherzadeh, M. J. and Niklasson, C., (2003), *Ethanol from Lignocellulosic Materials: Pretreatment, Acid and Enzymatic Hydrolyses and Fermentation*, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, 3 ed., pp. 6-9.
- Taherzadeh, M. J., Eklund, R., Gustafsson, L., Niklasson, C., and Liden, G., (1997), Characterization and Fermentation of Dilute-Acid Hydrolyzates from Wood, *Ind. Eng. Chem. Res., American Chemical Society*, vol. 36, pp. 4659-4665.